# 波線追跡ツールKARATによる精密大気遅延推定の補正効果

市川隆一<sup>1</sup>,トーマス・ホビガー<sup>2</sup>、小山泰弘<sup>2</sup>、近藤哲朗<sup>2,3</sup> <sup>1</sup> 情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター、<sup>2</sup> 情報通信研究機構、<sup>3</sup> 亞洲大学

## 1 はじめに

我々は、これまでに VLBI や GNSS(Global Satellite Navigation System\*) 技術で重大な誤差要因となる大気 遅延を数値天気予報データを用いて推定、および除去す るツール "KARAT (KAshima RAvtracing Tools)" の 開発を進めてきた [1, 2]。KARAT は、気温、気圧、水蒸 気分圧といった各気象要素の変動に応じて、現実の大気 に即した遅延量計算ができることに最大の利点がある。 Hobiger ら [1] は、東アジア周辺域の IGS 観測点 16 カ所 の4ヶ月間のデータの PPP(Precise Point Positioning/ 高精度単独測位)解析により、KARAT とGMF マッピ ング関数 [3] をそれぞれ用いた事例の大気遅延除去効果 を比較した。測位解の短期再現性での比較では、特に鉛 直成分について KARAT が GMF に対して 10%程度向 上、ないしは遜色ない結果が得られた。そこで、今回は 従来のマッピング関数とKARAT とをより詳細に評価す るために、国土地理院の GPS 観測網 "GEONET(GPS Earth Observation Network System)" 全観測点のデー タ解析結果で比較を行った。今回の比較では、あえて気 象条件の厳しい時期を選び、KARAT の適用限界を調 べることも目的とした。

## 2 大気遅延と KARAT

地球中性大気による見かけ上のマイクロ波の経路長の 伸び、すなわち伝搬遅延誤差 (Atmospheric Path Delay/ 以後これを"大気遅延"と呼ぶ)は、天頂方向で2.3-2.8m にも及び、これは時刻精度に換算すると 10<sup>-9</sup>秒 の桁に 達する大きさである。中性大気遅延は、静水圧平衡が仮 定できる大気成分<sup>†</sup>に起因する遅延量 (これを"静水圧遅 延量"と呼ぶ)が 80-90%、及び水蒸気に起因する遅延 (これを"湿潤遅延量"と呼ぶ)が残りを占める。従来の 研究で良く知られているように、静水圧遅延量が地上気 圧によるモデル推定によりミリの精度で補正可能であ る一方、天頂方向で数 cm-40cm と激しく変動する湿潤 遅延量はほとんどモデルでの予測不可能とされる。



図 1: 2009 年 1 月現在の KARAT で視線方向の湿潤遅 延量計算が可能な領域

従来の VLBI や GNSS 解析では、天頂方向の大気遅 延 (天頂遅延) と電波源の方向に投影して得られる視線 方向の大気遅延との比の仰角依存性を定式化した"マッ ピング関数 (mapping function)"を遅延除去に使用して きた [3, 4, 5, 6]。実際の VLBI や GNSS のデータ解析 では、これを様々な方位仰角各々についての偏微分係数 として最小自乗法により天頂遅延量を推定する。

一方、KARAT は、視線遅延量を実際の天気予報に 用いる数値予報データを用いて波線追跡法により計算 するツールであり、マッピング関数とは全く異なる発 想で開発を進めてきた。現在は、図1に示すような領 域をカバーする格子間隔約10km、経度方向に361、緯 度方向に289 個の格子点を持つメソスケール客観解析 データ(MANAL/Meso-scale analysis data)を主に用い て各種テストを行っている。2006 年 4 月以降、3 時間 毎の MANAL データが使用可能であり、これが現時点 での時間分解能となるが、実際の GPS 解析では30 秒

<sup>\*</sup>GPS、GLONASS、Galileo、あるいは準天頂衛星システムなどの衛星航法システムの総称

<sup>†</sup>主に水蒸気を除く酸素、窒素などで構成される乾燥大気成分

ないしはそれより短時間でのデータ取得を行うことか ら、KARATには線形に時間補完する機能も付加し、任 意の時刻での遅延量計算も可能である。また、MANAL データは鉛直方向には 10hPa 面 (高度約 36km)までし かデータがないが、これより上層はほぼ静水圧平衡が 保たれているため標準大気モデルに基づいて計算を行っ ている。

#### 3 解析

従来のマッピング関数による大気遅延補正に対して、 KARAT の補正効果がどの程度になるか評価するため に、国土地理院 GPS 観測網 GEONET のデータを用い て実際に解析を行って比較した。GEONET は全国約 1300 箇所に設置された電子基準点で構成される世界で も類をみない高密度 GPS 観測網である。各観測点で得 られたデータは毎日つくば市にある国土地理院に伝送 され、測地座標系の高精度維持や地震前後の断層運動解 明、あるいは定常的な地殻変動計測等に利用されてい る。このデータは、国土地理院が設置する匿名 ftp サー バから誰でもインターネット経由で取得可能である。



図 2: 本研究で解析対象とした期間の顕著な降雨分布 (気象庁資料 [9] より)

2007 年 7 月 1 日~8 月 31 日の 2ヶ月間にわたる GEONET 全点のデータ、IGS(International GNSS Service) から提供される GPS 衛星の精密軌道情報、及び各 衛星毎のクロックオフセット情報を入手し、観測点毎、 かつ5分ごとの毎の三次元位置を PPP 解析により求め た。この解析では、Takasu and Kasai による GPS 解析 ソフトウェア "GPSTools[7]" を用いた。ここでは、

- KARAT により推定した大気遅延を位相に換算し、 これを前もって除去した RINEX データ<sup>‡</sup>により解 析、
- 2. GMF と大気の水平変動を一平面で近似して推定す る勾配マッピング関数 [8] を用いて通常の RINEX データを解析
- 3. GMF のみを用いて通常の RINEX データを解析

の3通りの計算を行って、それぞれ出力される三次元測 位解の短期再現性で評価を試みた。

なお、比較に選んだ期間中、特に7月2-12日は西日 本において顕著な集中豪雨に見舞われ、また13日-15 日は台風4号の通過による降水、さらにその後も梅雨 前線の活発化による激しい降水があるような気象条件 であった[9](図2参照)。今回は、特にこのような状況 でのKARATの有効性について評価することも目的と している。

### 4 結果

2ヶ月間のデータ解析により得られた測位解三成分(南 北、東西、上下)の平均と標準偏差で表した短期再現性 を前章で述べた(1)-(3)のそれぞれの条件毎に計算し、 結果をまとめたのが表1である。ここでは、集中豪雨や 台風の襲来により大気構造の時空変動が激しかったと推 定される九州・四国・中国地方と、比較的静穏だった北 海道・東北地方、及び全国の3つに分けて示している。 また、全国の GEONET 観測点すべての測位解三成分 の短期再現性の頻度分布を示したのが図3である。

まず、表1から、いずれの解析手法でも九州・四国・ 中国地方での再現性の平均値が北海道・東北地方のそれ よりも明らかに大きいことがわかる。また、各値の標準 偏差の大きさは、得られた測位解のばらつきの程度を 示すが、これが同様に九州・四国・中国地方で特に上下 成分で大きい。解析手法の比較では、表1、及び図3か ら、*GMF*(勾配推定あり) < *KARAT* < *GMF*(勾配推 定なし)の順で短期再現性の値が大きいことがわかる。 また、測位解の水平成分、特に南北成分についてみる と、GMF(勾配推定なし)の結果に比べ、KARAT の優 位性が確認できる。

Hobiger らによる 4ヶ月にわたる東アジア域の IGS 観 測点データを用いた解析結果 [1] によれば、KARAT 適用 での測位解再現性が GMF(勾配あり) によるものと遜色

<sup>&</sup>lt;sup>‡</sup>The Receiver Independent Exchange Format/受信機に依存 しない GPS データの形式。テキストファイルになっている

	KARAT			<b>G</b> MF(勾配推定あり)			<b>G</b> MF(勾配推定なし)		
地域	南北	東西	上下	南北	東西	上下	南北	東西	上下
北海道、東北地方	$3.0{\pm}3.1$	$4.5 {\pm} 4.7$	$5.9{\pm}6.2$	$2.2{\pm}2.3$	$4.2 \pm 4.4$	$5.7 {\pm} 5.9$	$3.9{\pm}4.0$	$4.9{\pm}5.0$	$6.1 {\pm} 6.4$
九州、四国、中国地方	$3.7 \pm 3.9$	$6.1{\pm}6.5$	$9.6{\pm}10.0$	$3.0{\pm}3.1$	$5.5{\pm}6.0$	$8.8{\pm}9.3$	$4.8 {\pm} 4.9$	$6.1{\pm}6.5$	$9.4{\pm}9.9$
全国	$3.4{\pm}4.1$	$5.3{\pm}6.5$	$7.5 {\pm} 8.0$	$2.7 \pm 3.5$	$5.0{\pm}6.2$	$6.9{\pm}7.4$	$4.4{\pm}4.9$	$5.5{\pm}6.6$	$7.5{\pm}7.9$

ないか、10-12% 程度良くなることが示され、KARAT の優位性を結論付けている。一方、我々が解析に選んだ 期間中、九州から四国にかけての西日本では、梅雨前 線と台風4号の影響で集中豪雨に見舞われ、場所によっ ては1日で500-1100mm にも及ぶ降水量を観測した [9]。MANAL データの時間分解能は3時間にすぎない が、集中豪雨をもたらす積乱雲の発達から消長までは1 時間程度以下であるため、KARAT による補正効果が 充分ではなかったことが考えられる。これに対し、特に 7月の間は梅雨前線南方の湿潤の地域から北方の乾燥し た地域にかけて強い水蒸気勾配が生じており、この傾向 が南北方向の測位結果に影響したと考えられ、GMF(勾 配推定なし) に対する KARAT の優位性は、この影響を 効果的に除去できたことを示唆する。

数値天気予報データを用いる KARAT の最大の利点 は、予報モデルの精度が向上すれば、自動的に KARAT による大気遅延精度も上がることにある。また、良く なったモデルにより、過去に遡って改めて数値天気予 報データを生成することも可能で、これにより過去の GPS データの再評価もできる。現段階で、KARAT は マッピング関数による大気遅延補正とほぼ肩を並べるレ ベルに達したと考えられ、GNSS や VLBI 解析で推定 すべき未知パラメータを減らす効果ともあいまって今後 有効な大気遅延除去法となると期待できる。

#### 5 まとめ

Hobiger らの手法 [1, 2] により改良、かつ高速化さ れた波線追跡アルゴリズムにより、気象庁メソスケー ル客観解析データに基づく大気遅延を計算するツール "KARAT"を用い、GPS 解析に対する遅延量誤差の低 減効果を評価した。具体的には、国土地理院 GPS 観測 網 GEONET から得られる全国約 1300 点の観測データ 2ヶ月分を用いて、PPP 解析を行い1日毎の測位解の短 期再現性を指標として KARAT とマッピング関数を比 較した。特に鉛直成分での比較で、GMF[3] に勾配マッ ピング関数を組み合わせた場合の結果が最も再現性が 良く、KARAT はこれに続き、GMF のみを用いた結果 が最も悪かった。ただし、この解析期間中は、集中豪雨 や台風の影響が顕著であり、MANAL データの時空分 解能では大気遅延推定精度が充分ではなかった可能性が ある。一方、水平成分について見ると、GMF のみを用 いた場合より KARAT 解析での再現性が良く、大気構 造の水平変動を効果的に除去できていると言える。今後 より長期にわたる同様のデータ解析により、さらに詳細 な評価を行う予定である。

#### 謝辞

今回の解析では、国土地理院の匿名サーバから提供されるGEONET 全観測点のデータ、及び気象業務支援センターを介して入手可能な気象庁メソスケール客観解 析データを解析に用いた。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- Hobiger, T., Ichikawa R., Takasu T., Koyama Y., and Kondo T., Ray-traced troposphere slant delays for precise point positioning, *Earth Planets Space*, 60, e1–e4, 2008a.
- [2] Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Koyama and T. Kondo, Fast and accurate ray-tracing algorithms for real-time space geodetic applications using numerical weather models, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD010503, 2008b.
- [3] Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh, Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07304, 2006.

- [4] Niell, A. E., Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. J. Geophys. Res., 101, 3227-3246, 1996
- [5] Niell, A. E., A. J. Coster, F. S. Solheim, V. B. Mendes, P. C. Toor, R. B. Langley, and C. A. Upham, Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radionsonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI, *J. Atmos. Oceanic Technol., 18*, 830-850, 2001.
- [6] Boehm, J. and H. Schuh, Vienna Mapping Functions in VLBI analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L01603, doi:10.1029/2003GL018984, 2004.
- [7] Takasu, T. and S. Kasai, Evaluation of GPS Precise Point Positioning (PPP) Accuracy, *IEIC Technical Report*, 105(208), 40-45, 2005.
- [8] MacMillan, D.S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations, *Geo-phys. Res. Lett.*, 22, 1041-1044, 1995.
- [9] 平成19年度災害時自然現象報告書[災害時気象 速報]、-平成19年台風第4号及び梅雨前線によ る7月2日から7月17日にかけての大雨と暴風http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji-/saigaiji\_200702.pdf、気象庁編、2008.



図 3: 2008 年 7 月 1 日-8 月 31 日の期間の GEONET 全 観測点データを PPP 解析した結果得られた測位解の短 期再現性頻度分布の比較 (上から南北、東西、鉛直の各 成分を示す)。色の違いはそれぞれ解析で用いた大気遅 延除去法の違いを示す (本文参照)。